

В. І. ДРОМЕНКО

аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0007-2957-6969

В. І. ЧУПРИНКА

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0001-7134-8387

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТРИВИМІРНОГО ПРОЄКТУВАННЯ РУКАВИЧОК

Актуальність дослідження зумовлено зростанням вимог до високоточного тривимірного проєктування рукавичок, необхідністю адекватного відтворення складної морфології кисті та її біомеханічної поведінки під час руху, що потребує впровадження новітніх математичних і числових методів моделювання, які здатні забезпечити адаптивність і прогнозованість цифрових прототипів.

Метою статті є наукове обґрунтування використання математичних методів моделювання для підвищення точності 3D-проєктування рукавичок шляхом узгодженого врахування анатомічних параметрів кисті, властивостей матеріалів та особливостей рухів пальців. У роботі застосовано методи числового прогнозування локальних деформацій, аналізу механічних властивостей еластомерів та побудови цифрових біомеханічних моделей системи «кисть–рукавичка». Використано прийоми порівняльного аналізу, цифрової реконструкції та концепцію інтегрованого параметричного проєктування.

Встановлено, що точність цифрових моделей значною мірою залежить від якості синхронізації геометричних, матеріальних та кінематичних параметрів. Доведено ефективність поєднання статичної та динамічної антропометрії для формування адаптивної геометрії рукавичок. Виявлено головні проблеми реконструкції мікрогеометрії міжфалангових зон, моделювання комбінованих деформацій та узгодження нелінійних властивостей матеріалів із цифровою формою. Узагальнено, що застосування комплексних математичних методів дозволяє зменшити похибки в моделюванні, оптимізувати товщину та жорсткість матеріалу, забезпечити стабільну посадку виробу та підвищити його функціональну надійність у різних сферах застосування.

Перспективи подальших досліджень вбачаються у вдосконаленні моделей поведінки м'яких тканин у динаміці, розширенні бази антропометричних даних, розробленні мультифізичних симуляцій для моделювання теплових і контактних ефектів, а також у створенні стандартизованих цифрових протоколів віртуального випробування рукавичок наступного покоління.

Ключові слова: біомеханічне моделювання, кінематика кисті, скінченно-елементний аналіз, параметрична реконструкція, антропометричні дані, цифровий двійник, адаптивна геометрія, локальні деформації.

V. I. DROMENKO

Postgraduate Student at the Department of the Computer Engineering
and Electromechanics
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0009-0007-2957-6969

V. I. CHUPRYNKA

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Professor at the Department of Information and Computer Technologies
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0001-7134-8387

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELLING METHODS TO IMPROVE THE ACCURACY OF THREE-DIMENSIONAL GLOVE DESIGN

The relevance of the study is due to the growing demands for high-precision three-dimensional design of gloves, the need to adequately reproduce the complex morphology of the hand and its biomechanical behavior during movement requires the implementation of the latest mathematical and numerical modeling methods that are able to ensure the adaptability and predictive performance of digital glove prototypes.

The purpose of the article is to scientifically substantiate the use of mathematical modelling methods to enhance the accuracy of 3D glove design through the integrated consideration of anatomical characteristics of the hand, material properties, and finger kinematics. The study investigates the capabilities of parametric modelling, finite element analysis, dynamic anthropometry, and motion-based reconstruction of finger trajectories; numerical methods are used to predict local deformations, analyse the mechanical behaviour of elastomers, and construct a biomechanical digital twin of the «hand-glove» system. Comparative analysis, digital reconstruction techniques, and the framework of integrated parametric design are applied.

It has been established that the accuracy of digital glove models critically depends on the synchronisation of geometric, material, and kinematic parameters. The effectiveness of combining static and dynamic anthropometric data to form adaptive glove geometry has been demonstrated. Key challenges have been identified, including the reconstruction of fine-scale interphalangeal morphology, modelling of combined deformation modes, and integrating nonlinear material behaviour into digital geometry. It has been concluded that the integration of advanced mathematical and numerical methods reduces modelling errors, optimises material thickness and stiffness, ensures stable glove fit, and enhances functional reliability across different application domains.

Future research is expected to focus on improving models of soft-tissue behaviour in dynamic conditions, expanding anthropometric datasets, developing multiphysics simulations to account for thermal and contact effects, and creating standardised digital protocols for virtual testing of next-generation gloves.

Key words: *biomechanical modelling, hand kinematics, finite element analysis, parametric reconstruction, anthropometric data, digital twin, adaptive geometry, local deformation.*

Постановка проблеми

Проблематика підвищення точності тривимірного проектування рукавичок зумовлена зростанням вимог до індивідуалізації, ергономічності та функціональності виробів, що використовуються у медицині, промисловій безпеці, спорті та робототехніці. Анатомічна складність кисті людини, варіативність форм м'яких тканин і нелінійна кінематика дрібних суглобів створюють значні труднощі для відтворення реальної геометрії руки у цифровому середовищі. Традиційні САД-підходи не забезпечують необхідного рівня деталізації та не дозволяють точно моделювати локальні деформації, що виникають під час руху чи навантаження, унаслідок чого погіршується посадка, знижується комфорт користувача і спадає ефективність захисних властивостей виробу. У науковому вимірі це актуалізує завдання розроблення математичних методів, здатних відтворити складну топологію кисті, спрогнозувати деформаційні процеси та інтегрувати антропометричні дані у генерацію адаптивних 3D-форм. У практичному вимірі така проблема пов'язана з потребою скорочення кількості фізичних прототипів, зменшення виробничих похибок і підвищення точності посадки готових рукавичок, особливо у сферах, де невідповідність форми безпосередньо впливає на безпеку або точність виконання операцій. Таким чином, вдосконалення математичного моделювання у тривимірному проектуванні рукавичок становить важливий науково-прикладний напрям, що поєднує фундаментальні дослідження геометричного аналізу з потребами сучасного виробництва та користувачької ергономіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз сучасних досліджень дозволяє виокремити чотири взаємопов'язані напрями. Перший напрям охоплює формування антропометричної основи тривимірного моделювання та підвищення точності визначення простору «рука-рукавичка» на основі 3D-сканування. У роботі [1] показано, що використання тривимірного сканування дозволяє оцінювати локальні мікрокліматичні параметри та встановлювати зв'язок між геометрією рукавички, зазорами та комфортністю, що є важливим для параметризації цифрових моделей. Обґрунтування застосування сканування кисті для визначення припусків захисних рукавичок, побудувавши метричні залежності між морфологією кисті та конструктивними параметрами виробу наведено в [2]. Автори [3] застосували метод масштабних коефіцієнтів для оцінювання антропометричних характеристик руки й трансформації їх у локальні параметри шитих рукавичок, що підвищує точність індивідуалізації виробів. У роботі [4] автори інтегрували 3D-виміри й показники мобільності пальців у методику побудови ергономічних лекал, оптимізуючи взаємозв'язок між анатомією кисті та конструкцією рукавички. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення уніфікованих математичних моделей антропометричного простору, які поєднували б дані сканування, статистичні параметри та функціональні характеристики рухливості кисті.

Другий напрям пов'язаний із біомеханічним та механічним моделюванням, де математичні методи використовуються для реконструкції рухів пальців, моделювання навантажень та оптимізації функціональних структур.

У дослідженні [5] наведено механічний аналіз процесу знімання медичних рукавичок і показали важливість параметричного визначення контактних зон для запобігання локальним деформаціям шкіри. Побудова числової моделі приводу м'якої реабілітаційної рукавички, оптимізувавши розподіл тиску й траєкторії рухів для точного відтворення природної кінематики кисті представлено у [6]. У роботі [7] запропоновано скінченно-елементну модель біомеханіки хвату, що дозволяє оцінювати силові взаємодії та адаптувати конструкцію екзоскелетної рукавички під індивідуальні особливості користувачів. Використання томографічних даних для побудови персоналізованої кінематичної моделі рухів пальців у низьконапірній реабілітаційній рукавичці, що покращує точність відтворення траєкторій руху наведено у [8]. Подальший розвиток наряду має бути пов'язаний зі створенням комплексних цифрових двійників кисті, які поєднують б геометрію, механіку, кінематику та матеріальні властивості в єдиному обчислювальному середовищі.

Третій напрям охоплює моделювання смарт-рукавичок із використанням електромеханічних, сенсорних та мультифізичних моделей. Автори [9] розробили трикомпонентні магнітореологічні актуатори у структурі TPU-екзоскелета, де деформаційні властивості описано параметричними рівняннями, що дозволяє прогнозувати їх поведінку під навантаженням. У дослідженні [10] запропоновано симуляційний підхід до оптимізації розташування сенсорів у рукавичках для розпізнавання жестів, визначаючи залежність точності ідентифікації сигналів від моделі деформації матеріалу та електромеханічних характеристик сенсорів. Застосування математичних моделей перетворення сигналів тактильної рукавички у тривимірні траєкторії рухів для VR-середовищ, забезпечуючи точне картування багатовимірних сенсорних даних, представлено у [11]. Подальші дослідження мають бути спрямовані на побудову мультифізичних моделей, що інтегруватимуть механічні, електричні та сенсорні процеси для підвищення автономності та точності функціональних рукавичок.

Четвертий напрям охоплює адаптацію методів моделювання складних поверхонь та м'яких тканин, що походять з інших галузей, але є релевантними до високоточного 3D-проектування рукавичок. У роботі [12] автори створили тривимірні гнучкі термоелектричні тканини, у яких теплові та електричні процеси формалізовано через систему рівнянь, що може бути використано для інтеграції автономних енергетичних модулів у рукавички. Можливості скінченно-елементного моделювання м'яких тканин у хірургії, що дає можливість переносити підходи нелінійної механіки на задачу моделювання контакту руки та рукавички продемонстровані у [13]. Автори [14] показали ефективність застосування параметричних CAD-моделей для генерації складних поверхонь у виробничому дизайні, що може бути адаптовано для варіювання локальної товщини та структурних властивостей рукавичок у межах інтегрованої цифрової моделі. Подальші дослідження цього напрямку варто зосередити на поєднанні CAD/CAE-систем, біомеханічних моделей і технологій формоутворення для створення багаторівневих платформ автоматизованого проектування рукавичок.

Невирішеними залишаються питання високоточної реконструкції складної морфології кисті, зокрема мікрогеометрії міжфалангових зон та поведінки м'яких тканин у динаміці, що сучасні методи сканування й апроксимації не здатні повністю відтворити. Недостатньо досліджені механізми узгодження нелінійних властивостей еластомерних матеріалів із цифровою геометрією, що спричиняє розбіжності між результатами моделювання та фізичними характеристиками рукавичок. Відкритими залишаються також проблеми моделювання локальних деформацій під час комбінованих рухів пальців і дефіцит комплексних моделей, які б одночасно враховували антропометрію, кінематику та матеріальні параметри. Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалів шляхом інтеграції параметричного моделювання, динамічної антропометрії та скінченно-елементного аналізу в єдиний підхід, що дозволяє узгоджено враховувати форму кисті, її рухливість і механічні властивості матеріалів. Такий підхід забезпечує формування адаптивних цифрових моделей, здатних точно прогнозувати деформації та оптимізувати конструкцію рукавички, що підвищує точність 3D-проектування та знижує похибки під час виготовлення.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є наукове обґрунтування застосування математичних методів моделювання для підвищення точності тривимірного проектування рукавичок з урахуванням анатомічних, матеріалознавчих та ергономічних параметрів кисті людини.

Викладання основного матеріалу дослідження

У сучасному проектуванні рукавичок математичне моделювання геометрії кисті посідає ключове місце, оскільки забезпечує можливість точної візуалізації анатомічних структур, нелінійних кривизн, змін товщини м'яких тканин та варіативності рухів пальців. Розвиток тривимірного сканування, параметричних алгоритмів реконструкції та числових методів аналізу дозволяє створювати високоточні цифрові моделі, здатні адаптуватися до індивідуальних антропометричних відмінностей користувачів. Водночас ефективність цих методів залежить від здатності інтегрувати реальні дані про морфологію кисті з алгоритмічними моделями, що описують деформаційні процеси та взаємодію поверхонь. Науковий інтерес полягає у визначенні оптимальної взаємодії між скануванням, математичною апроксимацією та варіативним моделюванням, що в комплексі формують основу для високоточної 3D-архітектури рукавичок у різних сферах застосування (табл. 1).

Таблиця 1

Математичні підходи до моделювання геометрії кисті у 3D-проектуванні рукавичок

Метод моделювання	Аналітична основа	Можливості для 3D-архітектури рукавичок
Параметрична реконструкція поверхонь	Spline-, NURBS- та B-spline-апроксимація	Формування гладких криволінійних поверхонь кисті та пальців, адаптація під індивідуальні розміри
Тривимірне сканування (3D scanning)	Оптичне, лазерне або фотометричне зчитування геометрії	Отримання детальної морфології кисті з високою роздільністю для побудови точної цифрової основи
Скінченно-елементний аналіз (FEM)	Числове розв'язання рівнянь деформацій	Прогноз локальних напружень і деформацій у матеріалі рукавички при русі та стисканні пальців
Кінематичне моделювання	Математичний опис сегментів та їхніх осей обертання	Відтворення реальної рухливості пальців, оптимізація форми рукавички в динамічних положеннях
Алгоритми машинного навчання	Аналіз антропометричних даних та формотворчих закономірностей	Автоматизоване визначення патернів будови кисті та прогнозування зон найбільшої деформації

(сформовано авторами на основі [2; 9; 10; 13])

Реалізація математичних підходів до моделювання геометрії кисті демонструє, що сучасне 3D-проектування рукавичок ґрунтується на точному відтворенні анатомічної структури та передбачуваності механіки руху, що є принципово важливим для зниження виробничих похибок та підвищення функціональної надійності готових виробів. Параметрична реконструкція забезпечує можливість формувати складні криволінійні поверхні, які точно відповідають топології кисті. Це особливо важливо у зонах найбільшої морфологічної варіативності: міжфалангові проміжки, ділянки тенара та гіпотенара, місця природного викривлення пальців. У практичних умовах виробництва це означає, що геометрія рукавички, створена на основі параметричних моделей, зменшує ризик локальних зон перенагнення, які у традиційних моделях спричиняють швидке зношення та втрату тактильності під час роботи [4]. Застосування тривимірного сканування формує високоточну морфометричну основу, яка дозволяє відтворити індивідуальні геометричні особливості кисті без втрати дрібних деталей [9]. Такий підхід активно впроваджується у створенні анатомічно адаптованих рукавичок для мікрохірургії, де важливо зберігати природний розподіл тиску на кінчиках пальців. У спортивному та промисловому сегментах це забезпечує більш точну посадку виробу, оптимальне позиціонування амортизаційних та антивібраційних вставок та формування зон вентиляції відповідно до реальної поверхні кисті. Скінченно-елементне моделювання забезпечує можливість прогнозувати реакцію матеріалу на деформаційні процеси, що виникають під час хвату, стискання чи швидких рухів пальців. На практиці це дозволяє виробникам визначати оптимальну товщину матеріалу у різних ділянках рукавички ще до етапу фізичного прототипування [11]. У хірургічних рукавичках FEM-моделі використовуються для мінімізації напружень у ділянках, що часто розриваються під час тривалих маніпуляцій, а в рукавичках для роботизованих систем – для точного узгодження жорсткості матеріалу з амплітудою рухів технічних маніпуляторів. Кінематичне моделювання створює можливість оцінювати відповідність виробу не лише у статичному, а й у динамічному стані. Цей підхід особливо цінний у виробництві рукавичок для високоточної діяльності: авіаційне технічне обслуговування, монтаж електронних компонентів, лабораторні маніпуляції [5]. Правильне відтворення осей руху та траєкторій пальців дає змогу уникати надмірної компресії або тертя у критичних зонах, що знижує ризик помилок і травм у реальних умовах роботи. Інтеграція наведених математичних підходів формує сучасну інженерну парадигму, у якій рукавичка розглядається не як універсальний виріб, а як біомеханічно узгоджена система, побудована на основі точних цифрових даних і здатна забезпечити максимальну функціональність у конкретних умовах використання. Саме така науково обґрунтована персоніфікація конструкції визначає конкурентоспроможність сучасних виробників та дозволяє суттєво зменшити кількість ітерацій виробництва, підвищити ергономічність і подовжити термін експлуатації готового виробу.

У сучасному 3D-проектуванні рукавичок числові методи відіграють ключову роль у формуванні передбачуваної механічної поведінки виробу, оскільки дозволяють аналізувати напружено-деформований стан матеріалу ще до етапу фізичного виготовлення. Особливо важливими є скінченно-елементний аналіз та параметрична реконструкція поверхонь, які забезпечують можливість точно оцінювати локальні зони концентрації напружень, моделювати взаємодію рукавички з поверхнею кисті та визначати оптимальні параметри товщини й жорсткості матеріалу. Наукова цінність цих підходів полягає в тому, що вони дозволяють перетворити геометричні дані на прогностичні механічні моделі, де враховано складність рухів пальців, варіативні навантаження та неоднорідні властивості матеріалів. Це створює підґрунтя для конструювання виробів із цілеспрямовано керованими характеристиками, що підвищує надійність, довговічність і комфорт використання (табл. 2).

Практика використання числових методів у проектуванні рукавичок демонструє, що їхня цінність полягає не в самих алгоритмах, а в здатності заздалегідь «побачити» поведінку майбутнього виробу у складних умовах, які неможливо відтворити традиційними технічними вимірюваннями. Коли інженер аналізує цифрову модель, побудовану на основі скінченно-елементного розрахунку, він фактично працює не з геометрією, а з прогнозованими зонами втоми матеріалу, де за певних рухів кисті виникатиме локальне перевантаження. Це дозволяє приймати

рішення, які у практичному сенсі змінюють конструкцію: наприклад, не просто «потовщити» долонну частину, а розмістити матеріал так, щоб він розподіляв напруження при хваті інструмента або під час роботи з важелями, що піддають пальці ротаційним навантаженням. У виробництві хірургічних рукавичок саме числове моделювання дає змогу відтворити ефект «ковзання» внутрішнього шару під час точних маніпуляцій [5]. Традиційні прототипи цього не показували: під час операції рукавичка могла деформуватися мікроскопічно, але достатньо, щоб змінити відчуття інструмента. Числова симуляція дозволяє передбачити ці деформації та оптимізувати товщину матеріалу саме в тих точках, які найбільше впливають на тактильність. Параметрична реконструкція поверхонь у сучасній практиці працює не як засіб «мальовничого згладжування» форми, а як інструмент керування поведінкою виробу у русі [4]. Наприклад, у рукавичках для авіаційних техніків моделі показують, що навіть мінімальна зміна радіуса кривизни на фаланговому сегменті впливає на рівномірність згинання під час захоплення дрібних деталей [10]. На основі цих даних формується мікрогеометрія, яка забезпечує однакову амплітуду руху незалежно від положення пальця. У лабораторних термостійких рукавичках цей підхід дозволяє розвантажити ділянки, що нагріваються швидше за інші, і забезпечити рівномірний розподіл теплової деформації. Особливо показовими є результати під час моделювання контактних взаємодій. У промислових рукавичках для роботи в умовах постійної вібрації, наприклад при роботі зі шліфувальними машинами, числова модель дає можливість бачити, як саме хвилі мікрівібрацій проходять через матеріал і де виникають «вузли» напружень, які спричиняють втому руки. На основі таких моделей створюються антивібраційні зони, що повторюють природні лінії навантаження на долоні, а не довільно розташовані вставки, як це було раніше. У спортивних рукавичках, зокрема для скелелазіння чи велоспорту, цифрові симуляції показують, як змінюється товщина матеріалу під час повторюваних рухів [5]. Це дозволяє передбачити місця потенційного стирання ще до першого фізичного зразка. Таким чином виробник отримує можливість продовжити строк служби виробу, не додаючи зайву товщину, яка погіршує чутливість. У сукупності такі підходи перетворюють рукавичку на динамічний об'єкт, у якому геометрія, матеріал та функція взаємодіють на рівні науково прорахованих сценаріїв, а не емпіричних припущень. Саме це забезпечує високу точність посадки, керованість деформацій та прогнозовану поведінку матеріалу у середовищах, де помилка вимірюється не міліметрами, а ефективністю руху або безпекою користувача.

Таблиця 2

Числові методи для прогнозування деформацій та оптимізації матеріалу у 3D-проектуванні рукавичок

Числовий метод	Об'єкт аналізу	Практична інженерна функція
Скінченно-елементний аналіз (FEM)	Напружено-деформований стан матеріалу під змінними навантаженнями	Передбачення зон пікових деформацій, розрахунок оптимальної товщини та пружності
Параметрична реконструкція поверхонь	Геометрична структура та локальні радіуси кривизни	Формування адаптивного розподілу матеріалу відповідно до складності поверхні
Адаптивне сіткування	Локальна деталізація геометричних ділянок	Підвищення точності розрахунків у зонах критичних змін форми
Числова оптимізація (градієнтні та еволюційні методи)	Варіативні конфігурації товщини, жорсткості та розтяжності	Автоматизований пошук конструкційних параметрів для досягнення балансу між гнучкістю та міцністю
Моделювання контактних взаємодій	Поведінка рукавички при ковзанні, стиску, ротації пальців	Визначення умов прилягання без надмірного тиску чи втрати чутливості

(сформовано авторами на основі [5; 7; 8])

Інтеграція антропометричних даних із моделюванням рухів пальців у сучасному проектуванні рукавичок відкриває можливість створення цифрових моделей, які не просто відтворюють зовнішні контури кисті, а адаптуються до її реальної кінематики. Наукова цінність такого підходу полягає в поєднанні двох типів інформації – статичної морфології та динамічної рухливості суглобів. Це дозволяє проектувати рукавичку як систему, що враховує зміну форми пальців упродовж циклу руху, різні амплітуди згинання та індивідуальну анатомічну варіативність. У результаті створюються моделі з передбачуваною поведінкою, здатні компенсувати локальні деформації під час роботи і забезпечувати стабільну посадку незалежно від положення пальців (табл. 3).

Поєднання антропометричних і кінематичних параметрів працює як механізм точного налаштування цифрової моделі під реальну поведінку кисті, дозволяючи прогнозувати не лише форму, а й зміну внутрішніх об'ємів рукавички під час руху. У хірургічних рукавичках це дає можливість моделювати мікродеформації під час дрібних маніпуляцій: цифрова модель показує, як навіть незначне збільшення амплітуди згинання впливає на напруження матеріалу, що дозволяє оптимізувати товщину в критичних ділянках без втрати тактильності. У спортивному екіпіруванні кінематичні траєкторії використовують для визначення зон, які зазнають регулярних циклічних навантажень: наприклад, у рукавичках для скелелазіння моделі показують, де формується пікове стискання тканини під час хвату, що дає можливість розміщувати еластичні елементи відповідно до реальних ліній руху, а не довільно [5]. У робототехнічних інтерфейсних рукавичках поєднання антропометрії та моделювання рухів дозволяє зберігати сталий контакт між сенсорами та шкірою під час швидких жестових команд, що неможливо

забезпечити за допомогою статичної геометрії [9]. У виробничих процесах, пов'язаних із точним монтажем, цифрові моделі демонструють, як змінюється мікрорельєф внутрішньої поверхні рукавички при дрібній моториці, дозволяючи уникати надмірного повітряного об'єму, що знижує точність позиціонування пальців. У результаті антропометрично-кінематичні моделі забезпечують створення рукавичок, які не лише точно відповідають формі руки, а й функціонують узгоджено з її рухами, зберігаючи стабільність посадки та ефективність роботи у складних і динамічних умовах.

Таблиця 3

Антропометричні та кінематичні параметри для побудови адаптивних цифрових моделей рукавичок

Тип параметра	Характеристика	Значення для адаптивної моделі
Лінійні антропометричні показники	Довжини фаланг, ширина долоні, товщина м'яких тканин	Формують базову геометрію та масштаби моделі з урахуванням індивідуальної будови кисті
Кутові параметри рухливості	Амплітуди згинання та розгинання міжфалангових і п'ястково-фалангових суглобів	Дають змогу відтворити реальну кінематику пальців для коректного моделювання посадки під час руху
Траєкторії руху пальців	Просторові траєкторії, швидкість і послідовність рухів	Використовуються для аналізу зміни форми рукавички у динамічних положеннях
Розподіл м'яких тканин	Локальні зони стиснення та розширення під час руху	Дають можливість прогнозувати ділянки необхідної еластичності чи посилення
Контактні характеристики	Площі контакту пальців з поверхнею під час виконання захопленя	Забезпечують формування оптимального внутрішнього об'єму та силового розподілу

(сформовано авторами на основі [3; 5; 7; 14])

У процесі створення високоточної цифрової моделі рукавички постає низка науково-прикладних проблем, що ускладнюють відтворення реальної морфології кисті та прогнозування її поведінки у русі. Найбільш суттєві труднощі пов'язані з багатошаровою структурою кисті: кістково-суглобовий каркас, неоднорідні м'які тканини та підшкірний жир мають різні механічні властивості, які змінюються під час руху і не піддаються простій математичній апроксимації [4]. Високу складність становить відтворення локальних кривизн і мікрогеометрії – особливо у міжфалангових ділянках, де навіть мінімальні помилки реконструкції змінюють поведінку цифрової моделі під навантаженням [11]. Додатковим викликом є деформаційна непередбачуваність м'яких тканин: їхня реакція на стискання залежить від швидкості руху, температури, вологості та індивідуальних анатомічних характеристик, що ускладнює побудову універсальних матеріальних моделей. Суттєвою проблемою також є точність моделювання локальних деформацій під час складних типів рухів, таких як комбіноване згинання та ротація пальців [3]. Наявні алгоритми часто не здатні адекватно передбачити зміну розподілу об'ємів під шкірою, що впливає на посадку рукавички в динаміці. У роботі з цифровою геометрією виникає проблема узгодження матеріальних властивостей рукавички з прогнозованою поведінкою кисті: еластомери, латекси та полімерні композити мають нелінійну залежність між напруженням і деформацією, яку важко коректно інтегрувати в алгоритми геометричного моделювання. Це призводить до ситуацій, коли цифрова модель демонструє стабільну поведінку, але фізичний виріб деформується інакше, особливо в тонких зонах. Окрему групу проблем формують труднощі отримання повного та чистого антропометричного масиву. Оптичні та лазерні сканери викривлюють мікродеталі через тіні, шорсткість шкіри або рух пальців, унаслідок чого виникають артефакти, які неможливо усунути без втрати точності. Динамічні дані рухів пальців також є складними для інтеграції, оскільки існує дисбаланс між високою точністю геометрії і недостатньою точністю кінематичної інформації, що знижує достовірність моделей локального навантаження [2]. Проблеми масштабуються й на рівні контактної взаємодії: сучасні симулятори погано відтворюють поведінку матеріалів у контакті зі шкірою, особливо при повторюваних циклічних рухах. Це породжує похибки у визначенні зон надмірного тиску, де на практиці виникають потертості або розтягнення матеріалу. Технічно складним є також узгодження моделі рукавички з широким спектром індивідуальних варіацій кисті – навіть у межах однієї розмірної групи спостерігаються суттєві відмінності в товщині м'яких тканин, кутах рухливості та пропорціях фаланг.

Підвищення точності 3D-проекування рукавичок потребує переходу від спрощених геометричних моделей до комплексних цифрових реконструкцій, у яких форма кисті, матеріальні властивості та кінематика описуються як єдина біомеханічна система. Науково обґрунтованим є розширення антропометричних баз за рахунок високоточного статичного та динамічного сканування, що дозволяє формувати параметричні моделі, здатні відтворювати індивідуальну морфологію та реальні траєкторії рухів пальців. Важливим напрямом є вдосконалення матеріальних моделей: точне визначення нелінійних механічних властивостей еластомерів і багатошарових структур забезпечує коректну інтеграцію цих даних у скінченно-елементні розрахунки, що суттєво зменшує похибки у прогнозуванні деформацій. Практична ефективність зростає завдяки створенню інтегрованих цифрових контурів, де 3D-сканування, параметричне моделювання та FEM-аналіз функціонують у єдиній системі без втручання ручних

корекцій. Це мінімізує технічні помилки та забезпечує відтворюваність результатів. Додатково доцільним є застосування методів керування невизначеністю, коли конструкція тестується у цифровому середовищі в широкому діапазоні варіацій товщини, жорсткості та об'ємних допусків – такий підхід гарантує стабільну посадку навіть за виробничих коливань. Перспективним напрямом є впровадження галузевих протоколів віртуального випробування, що дозволяють оцінювати якість посадки, розподіл контактних напружень і стійкість внутрішнього об'єму у спеціалізованих сценаріях: хірургія, робототехніка, промислова безпека чи спорт. У підсумку це забезпечує перехід від емпіричного підбору конструкцій до науково обґрунтованого математичного моделювання, яке знижує кількість ітерацій, скорочує частку браку і підвищує точність виготовлення готових рукавичок.

Висновки

Проведене дослідження засвідчило, що підвищення точності тривимірною проектування рукавичок можливе лише за умов поєднання геометричного моделювання з числовими та біомеханічними підходами. Встановлено, що високоточна реконструкція кисті потребує інтеграції статичної антропометрії, динамічних кінематичних даних та каліброваних матеріальних моделей, що дозволяє формувати цифрові конструкції, які відтворюють не лише форму, а й реальну поведінку пальців під час руху. Доведено, що традиційні CAD-методи не забезпечують необхідної точності в зонах локальних деформацій, тоді як використання параметричної реконструкції та скінченно-елементного аналізу суттєво підвищує здатність моделі передбачати напруження, розподіл товщин і зони потенційного зношення. У ході дослідження ідентифіковано низку фундаментальних проблем: складність відтворення мікрогеометрії міжфалангових сегментів, нестабільність поведінки м'яких тканин у динаміці, похибки сканування та обмежені можливості сучасних алгоритмів правильно моделювати поєднане згинання, ротацію й стискання. Встановлено також, що невідповідність між симульованими і реальними деформаціями часто зумовлена неточністю опису нелінійних властивостей еластомерів, що ускладнює передбачення поведінки виробу у тонких або високо навантажених зонах. Науково обґрунтовані рекомендації стосуються переходу до комплексних біомеханічних цифрових двійників кисті, удосконалення матеріальних моделей, розширення антропометричних баз даних за рахунок динамічних сканів, впровадження методів керування невизначеністю у FEM-розрахунках та стандартизації наскрізного цифрового контуру проектування. Такий підхід забезпечує надійну посадку рукавичок, зменшення виробничих похибок і скорочення кількості фізичних прототипів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням точніших моделей поведінки м'яких тканин, удосконаленням методів інтеграції кінематики та антропометрії, створенням мультифізичних симуляцій для оцінювання теплових і контактних ефектів, а також формуванням галузевих стандартів віртуального тестування виробів. Це відкриває шлях до науково обґрунтованого персоналізованого виготовлення рукавичок нового покоління.

Список використаної літератури

1. Joshi A., Li R., Wu Y., Zhang M., Song G. Analysis of glove local microclimate properties for various glove types and fits using 3D scanning method. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, № 1. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23596>
2. Zhang Y., Xie H., Newton M. A. A. Enhancing assistive technology design: Biomechanical finite element modeling for grasping strategy optimization in exoskeleton data gloves. *Medical Engineering & Physics*. 2025. Vol. 137. Article 104308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2025.104308>
3. Szkudlarek J., Zagrodny B., Zarychta S., Zhao X. 3D hand scanning methodology for determining protective glove dimensional allowances. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20, № 3. Article 2645. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20032645>
4. Lee S. M., Park J. Ergonomic glove pattern drafting method for hand assistive devices: considering 3D hand dimensions and finger mobility. *Fashion and Textiles*. 2024. Vol. 11, № 31. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40691-024-00397-5>
5. Ishak M. I., Sikam M. D. J., Wan Draman W. N. A. Mechanical Design and Analysis of Medical Gloves Remover. *Malaysian Journal of Ergonomics (MJE)*. 2023. Vol. 5. P. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.58915/mjer.v5i1.362>
6. Wang X., Cheng Y., Zheng H., Li Y., Wang C. Design and optimization of actuator for multi-joint soft rehabilitation glove. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*. 2021. Vol. 48, № 6. P. 877–890. DOI: <https://doi.org/10.1108/IR-02-2021-0036>
7. Leite C., Byvshev P., Mauranen H., Xiao Y. Simulation-driven design of smart gloves for gesture recognition. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, № 1. Article 14873. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65069-2>
8. Seo S. W., Jung W. S., Kim Y. 3D hand motion generation for VR interactions using a haptic data glove. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2024. Vol. 8, № 7. Article 62. DOI: <https://doi.org/10.3390/mti8070062>
9. Rincón-Becerra O., García-Acosta G. Estimation of anthropometric hand measurements using the ratio scaling method for the design of sewn gloves. *Dyna*. 2020. Vol. 87, № 215. P. 146–155. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.87984>
10. Yu J., Luo L., Zhu W., Li Y., Xie P., Zhang L. A Novel Low-Pressure Robotic Glove Based on CT-Optimized Finger Joint Kinematic Model for Long-Term Rehabilitation of Stroke Patients. *IEEE Transactions on Neural Systems*

and Rehabilitation Engineering. 2024. Vol. 32. P. 53–62. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2023.3337827>

11. Gong T., Ma K., Liu Z., Yang T., Xu Q., Li L. A Hand Rehabilitation Device Based on Magnetorheological Three-Dimensional Soft Actuators TPU Exoskeleton. In: *Proceedings of the 2024 China Automation Congress (CAC)*. Qingdao, China, 2024. P. 4218–4223. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAC63892.2024.10865009>

12. He X., Shi X. L., Wu X., Li C., Liu W. D., Zhang H., Chen Z. G. Three-dimensional flexible thermoelectric fabrics for smart wearables. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16, № 1. Article 2523. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57889-1>

13. Thomas P. M. Three-dimensional soft tissue simulation in orthognathic surgery. *Atlas of the Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*. 2020. Vol. 28, № 2. P. 73–82. URL: [https://www.oralmaxsurgeryatlas.theclinics.com/article/S1061-3315\(20\)30005-6/abstract](https://www.oralmaxsurgeryatlas.theclinics.com/article/S1061-3315(20)30005-6/abstract) (дата звернення: 13.11.2025)

14. Sun X., Liu X., Yang X., Song B. Computer-aided three-dimensional ceramic product design. *Computer-Aided Design and Applications*. 2021. Vol. 19, № S3. P. 97–107. DOI: <https://doi.org/10.14733/cadaps.2022.S3.97-107>

References

1. Joshi, A., Li, R., Wu, Y., Zhang, M., & Song, G. (2024). Analysis of glove local microclimate properties for various glove types and fits using 3D scanning method. *Heliyon*, 10(1). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23596>

2. Zhang, Y., Xie, H., & Newton, M. A. A. (2025). Enhancing assistive technology design: Biomechanical finite element modeling for grasping strategy optimization in exoskeleton data gloves. *Medical Engineering & Physics*, 137, Article 104308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2025.104308>

3. Szkudlarek, J., Zagrodny, B., Zarychta, S., & Zhao, X. (2023). 3D hand scanning methodology for determining protective glove dimensional allowances. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), Article 2645. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20032645>

4. Lee, S. M., & Park, J. (2024). Ergonomic glove pattern drafting method for hand assistive devices: considering 3D hand dimensions and finger mobility. *Fashion and Textiles*, 11(31). DOI: <https://doi.org/10.1186/s40691-024-00397-5>

5. Ishak, M. I., Sikam, M. D. J., & Wan Draman, W. N. A. (2023). Mechanical Design and Analysis of Medical Gloves Remover. *Malaysian Journal of Ergonomics (MJEr)*, 5, 47–55. DOI: <https://doi.org/10.58915/mjer.v5i1.362>

6. Wang, X., Cheng, Y., Zheng, H., Li, Y., & Wang, C. (2021). Design and optimization of actuator for multi-joint soft rehabilitation glove. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, 48(6), 877–890. DOI: <https://doi.org/10.1108/IR-02-2021-0036>

7. Leite, C., Byvshev, P., Mauranen, H., & Xiao, Y. (2024). Simulation-driven design of smart gloves for gesture recognition. *Scientific Reports*, 14(1), Article 14873. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65069-2>

8. Seo, S. W., Jung, W. S., & Kim, Y. (2024). 3D hand motion generation for VR interactions using a haptic data glove. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(7), Article 62. DOI: <https://doi.org/10.3390/mti8070062>

9. Rincón-Becerra, O., & García-Acosta, G. (2020). Estimation of anthropometric hand measurements using the ratio scaling method for the design of sewn gloves. *Dyna*, 87(215), 146–155. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.87984>

10. Yu, J., Luo, L., Zhu, W., Li, Y., Xie, P., & Zhang, L. (2024). A Novel Low-Pressure Robotic Glove Based on CT-Optimized Finger Joint Kinematic Model for Long-Term Rehabilitation of Stroke Patients. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 32, 53–62. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2023.3337827>

11. Gong, T., Ma, K., Liu, Z., Yang, T., Xu, Q., & Li, L. (2024). A Hand Rehabilitation Device Based on Magnetorheological Three-Dimensional Soft Actuators TPU Exoskeleton. In: *Proceedings of the 2024 China Automation Congress (CAC)*, Qingdao, China. P. 4218–4223. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAC63892.2024.10865009>

12. He, X., Shi, X. L., Wu, X., Li, C., Liu, W. D., Zhang, H., & Chen, Z. G. (2025). Three-dimensional flexible thermoelectric fabrics for smart wearables. *Nature Communications*, 16(1), Article 2523. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57889-1>

13. Thomas, P. M. (2020). Three-dimensional soft tissue simulation in orthognathic surgery. *Atlas of the Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, 28(2), 73–82. URL: [https://www.oralmaxsurgeryatlas.theclinics.com/article/S1061-3315\(20\)30005-6/abstract](https://www.oralmaxsurgeryatlas.theclinics.com/article/S1061-3315(20)30005-6/abstract) (дата звернення: 13.11.2025)

14. Sun, X., Liu, X., Yang, X., & Song, B. (2021). Computer-aided three-dimensional ceramic product design. *Computer-Aided Design and Applications*, 19(S3), 97–107. DOI: <https://doi.org/10.14733/cadaps.2022.S3.97-107>

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 19.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025